

УДК 528.2: 629.78

В.М.Кондратюк, директор ННЦ «Аэрокосмический центр»

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ КОДОВО-ФАЗОВОГО ГНСС-ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Национальный авиационный университет, kon_vm@ukr.net

Рассмотрены различные подходы к решению задачи координатных определений движущихся объектов с дециметровым уровнем точности в дифференциальном режиме с использованием кодовых и фазовых ГНСС-наблюдений. Предложены усовершенствованные алгоритмы обработки ГНСС-наблюдений, в частности, реализующие leveling-метод и метод комбинирования дифференциального кодового решения и фазового float-решения.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые наблюдения, кодовые и фазовые наблюдения, алгоритм, позиционирование, дециметровый уровень точности, движущийся объект

Введение. Для определения местоположения (позиционирования) движущихся объектов по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в дифференциальном режиме с дециметровой точностью используют методы совместной обработки кодовых и высокоточных фазовых наблюдений – фильтрацию/сглаживание («smoothing», «leveling») кодовых наблюдений с использованием фазовых наблюдений, что обусловлено относительной простотой и надежностью такого подхода [1]. Подобные методы обработки позволяют эффективно уменьшить наиболее значимые погрешности дифференциальных кодовых наблюдений – погрешности, обусловленные многолучевостью и шумами [1-3].

Анализ современного рынка спутниковых навигационных технологий показывает, что при требованиях дециметровой точности позиционирования использование методов совместной обработки кодово-фазовых наблюдений без решения задачи разрешения фазовой неоднозначности получило широкое применение. Подобные технологии активно используются для решения задач управления транспортом, точного земледелия, геоинформатики и множества других приложений. Ведущие мировые производители, в частности, NovAtel, Hemisphere, Trimble и другие компании уделяют особое внимание данному сегменту рынка.

Поэтому поиск и разработка новых, более совершенных методов и алгоритмов кодово-фазового позиционирования является актуальным и востребованным направлением, что подтверждается современными публикациями по данному направлению. Анализ литературных источников [1-3, 9, 10] свидетельствует о том, что существующие методы и алгоритмы являются зарубежными, и многие «тонкие» аспекты, связанные с практической реализацией данных подходов не представлены в печати, что затрудняет их воспроизведение. Следует отметить, что большинство алгоритмов предусматривают использование только двухчастотных наблюдений с целью уменьшения или снижения влияния ионосферной погрешности, а также, не учитывают влияние дополнительных источников погрешностей, свойственных только фазовым наблюдениям, в частности, так называемого, «wind-up» эффекта [4], который проявляется при кинематических измерениях в процессе эволюций (поворотах, вращениях) движущихся объектов.

Исходя из вышесказанного, возникает задача развития отечественных методов и алгоритмов обработки ГНСС-наблюдений для решения задач высокоточной навигации и управления движением, опираясь на опыт и достижения в данном направлении зарубежных исследователей.

В настоящей работе представлены результаты разработки и экспериментальных исследований двух типов алгоритмов одночастотного высокоточного кинематического позиционирования дециметрового уровня точности, реализующих leveling-метод и метод комбинирования дифференциального кодового решения и фазового float-решения, в сравнении с известным алгоритмом фильтрации - Hatch-фильтром [3]. По результатам экспериментальных исследований предложенных алгоритмов точного кодово-фазового позиционирования сформулированы рекомендации по их применению в различных условиях.

1. Алгоритмы использования фазовых ГНСС-наблюдений для решения задач высокоточного позиционирования и навигации

Общая задача, которая решается при совместном использовании кодовых и фазовых ГНСС-наблюдений, заключается в получении оптимальной оценки уровня неоднозначных высокоточных

фазовых наблюдений относительно однозначных, но зашумленных и отягощенных многолучевостью кодовых наблюдений, после чего выполняется «замена» кодовых наблюдений фазовыми путем коррекции уровня фазовых наблюдений. Существующие методы и алгоритмы сглаживания /фильтрации для решения поставленной задачи можно разделить следующим образом [1, 2]: Hatch-фильтр и его производные; leveling- алгоритмы, основанные на подборе (оптимальной оценке) уровня фазовых наблюдений относительно кодовых за счет усреднения на некотором интервале наблюдений; алгоритмы комбинирования кодового и фазового float- решения.

1.1 Классический Hatch-фильтр. Первые детальные исследования, посвященные принципам и алгоритмам совместной обработки кодовых и фазовых псевдодальностей были представлены в работах R.Hatch еще в начале 80-х годов, поэтому, такие алгоритмы сглаживания в литературе получили название «Hatch-фильтры». Принцип заключается в оптимальной оценке разности кодовых и фазовых псевдодальностей (или их ЛК) с последующей заменой кодовых наблюдений (или их ЛК) фазовыми, скорректированными на величину оцененной разности.

Рекурсивная формула сглаживающего фильтра запишем следующим образом [1, 3]:

$$\bar{S}(t_i) = w \cdot S(t_i) + (1 - w) \cdot (\bar{S}(t_{i-1}) + \delta L(t_i, t_{i-1})), \quad (1)$$

где $\bar{S}(t_i)$ – сглаженное значение кодовой псевдодальности на момент t_i , $S(t_i)$ – кодовая псевдодальность на момент t_i , $\delta L(t_i, t_{i-1}) = L(t_i) - L(t_{i-1})$ – разность фазовых наблюдений, w – изменяемый во времени весовой множитель. Погрешность сглаживания определяется погрешностью оценки уровня фазовой псевдодальности относительно кодовой и зависит от объема выборки.

Простота реализации данного подхода дала толчок к дальнейшему развитию направлению совместной обработки наблюдений. Усовершенствования и разновидности данного алгоритма были усовершенствования направлены на поиск оптимальных постоянных времени фильтров, преодоления влияния фазовых циклических скачков и т.д.

1.2 Усовершенствованный leveling-алгоритм. В работе [5] приведены результаты разработки и верификации нового алгоритма кодовых наблюдений с использованием непрерывных фазовых наблюдений в режиме кинематической съемки, который, в отличие от известных алгоритмов, учитывает влияние «wind-up»-эффекта, использует представление уравнений наблюдений в виде т.н. «виртуальных двойных разностей». Ниже представлена исходная система уравнений, которая использовалась при разработке алгоритма.

$$\begin{cases} \Delta \hat{S}^j(t_k) = \Delta R^j(t_k) + \underbrace{\Delta(t_k) + \Delta b_S}_{\eta_S} + \Delta Tr^j(t_k) + \Delta I^j(t_k) + \delta \Delta S^j(t_k) \\ \Delta \hat{L}^j(t_k) = \Delta R^j(t_k) + \underbrace{\Delta(t_k) + \Delta b_L}_{\eta_L} + \Delta Tr^j(t_k) - \Delta I^j(t_k) - \Delta N^j \cdot \lambda_1 + w(t_k) + \delta \Delta L^j(t_k) \end{cases}, \quad (2)$$

где $\Delta \hat{S}^j(t_k)$, $\Delta \hat{L}^j(t_k)$ – одинарные разности кодовых и фазовых наблюдений; $\Delta R^j(t_k) = \hat{R}_{Повер}^j(t_k) - \hat{R}_{BC}^j(t_k)$ – одинарная разность дальностей (БС-базовая станция или опорный приемник); η_S , η_L – переменные, включающие в себя расхождения шкал времени между приемными пунктами и разности задержек в трактах приемников; $\Delta Tr^j(t_k)$ – разность тропосферных задержек; $\Delta I^j(t_k)$ – разность ионосферных задержек; ΔN^j – одинарная разность фазовых неоднозначностей; $w(t_k)$ – «wind-up» эффект; $\delta \Delta S^j(t_k)$, $\delta \Delta L^j(t_k)$ – многолучевая и шумовая составляющие погрешности.

В процессе обработки в наблюдениях учитываются $\hat{R}_{BC}^j(t_k)$ и вводятся коррекции на задержки в слоях атмосферы. После линеаризации системы уравнений и выполнения levelling-операции кодовых наблюдений с использованием фазовых с учетом влияния «wind-up» - эффекта, система уравнений примет следующий вид:

$$\Delta \tilde{S}^m(t_k) = \left\| a_{\tilde{X}}^m(t_k) \right\| \cdot \Delta \tilde{X}(t_k) + \tilde{\eta}_{SL}(t_k) + \tilde{\delta f}^m(t_k) + \delta \Delta L^m(t_k), \quad (3)$$

где $\Delta \tilde{X}(t_k)$ и $\tilde{\eta}_{SL}(t_k)$ – оцениваемые параметры; $\tilde{\delta f}_{(j=1,m)}^j(t_k)$ – медленноменяющиеся составляющие погрешности.

1.3 Алгоритм комбинирования дифференциального кодового и фазового float-решения

Отличительной особенностью данного алгоритма, по сравнению предыдущими, является то, что в обработку совместно включаются кодовые и фазовые наблюдения, без непосредственного осуществления операций сглаживания/фильтрации. Оценка «уровня» фазовых наблюдений относительно кодовых осуществляется совместно с оценкой координатно-временных параметров. Фактически данный алгоритм реализует float-метод обработки фазовых наблюдений, при котором целочисленные фазовые неоднозначности трактуются как непрерывные неизвестные параметры, оценка которых осуществляется совместно с остаточными систематическими погрешностями двойных разностей фазовых наблюдений. В процессе обработки кодовым и фазовым наблюдениям придаются соответствующие весовые коэффициенты.

Следует отметить, что по результатам предварительных исследований данный подход к обработке является наиболее подходящим при обработке наблюдений ГНСС ГЛОНАСС [6].

При разработке алгоритма использовалась система уравнений (2) после выполнения линеаризации и ввода тропосферных и ионосферных (регулярная составляющая) коррекций:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta S_{AB}^1(t_k) = \|a_{\bar{X}}^1(t_k)\| \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \mu_S(t_k) + \delta \Delta S_{AB}^1(t_k) \\ \Delta S_{AB}^m(t_k) = \|a_{\bar{X}}^m(t_k)\| \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \mu_S(t_k) + \nabla \Delta I_{\text{фл}AB}^{m1}(t_k) + \delta \nabla \Delta \text{Tr}_{AB}^{m1}(t_k) + \nabla \Delta S_{\text{мл}AB}^{m1}(t_k) + \delta \Delta S_{AB}^{m1}(t_k) \\ \dots \\ \Delta L_{AB}^1(t_k) = \|a_{\bar{X}}^1(t_k)\| \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \mu_L(t_k) + \delta \Delta L_{AB}^1(t_k) \\ \Delta L_{AB}^m(t_k) = \|a_{\bar{X}}^m(t_k)\| \cdot \Delta \bar{X}(t_k) + \mu_L(t_k) - \nabla \Delta N_{AB}^{m1} \cdot \lambda_1 - \nabla \Delta I_{\text{фл}AB}^{m1}(t_k) + \delta \nabla \Delta \text{Tr}_{AB}^{m1}(t_k) + \delta \Delta L_{AB}^m(t_k) \end{array} \right. , (4)$$

где $\Delta \bar{X}(t_k)$, $\mu_S(t_k)$, $\mu_L(t_k)$ и $\nabla \Delta N_{AB}^{m1} \cdot \lambda_1$ – оцениваемые параметры.

2. Практическая реализация алгоритмов обработки дифференциальных наблюдений

Все вышеописанные алгоритмы обработки были реализованы с использованием программной среды Matlab. Для выполнения экспериментальных исследований использовались наборы ГНСС-наблюдений, полученные в рамках проведения совместных экспериментов Национального авиационного университета (НАУ) с Главной астрономической обсерваторией НАН Украины (ГАО НАНУ) в 2008 году и в рамках проведения проекта EEGSFP7 ГАО НАНУ в 2011 году.

При проведении тестирования и исследований разработанных процедур обработки используемые наблюдения подвергались предварительной обработке с использованием программного обеспечения (ПО) «ОСТАВА_PPA» [7, 8], которое позволило оценить качество используемых кодовых и фазовых наблюдений, устранить циклические фазовые скачки, восстановить непрерывность фазовых наблюдений и т.д. С использованием ПО «GrafNav/GrafNet» (NovAtel Inc./Waypoint, Канада) были получены высокоточные (с сантиметровой точностью) эталонные оценки координат объектов [8].

На рис. 1, 2 в качестве примеров приведены отклонения координатных решений, полученных для статического и движущегося объектов на удалениях 3 м, 70 м, 75 км и 97 км от опорного приемника соответственно, для интервалов наблюдений 15 и 5 минут. Послесекансная обработка наблюдений выполнялась с использованием трех алгоритмов, описанных выше.

3. Сравнительный анализ полученных результатов. По результатам обработки множества кинематических и статических сессий можно сделать следующие выводы.

1. Предложенные алгоритмы позволяют получить дециметровую точность позиционирования как для кинематических, так и для статических объектов даже на коротких интервалах наблюдений. Разработанные алгоритмы протестированы в режиме послесекансной обработки, но в дальнейшем могут быть адаптированы для решения задач в режиме реального времени (realtime kinematic).

2. Сравнительный анализ результатов экспериментов показал, что алгоритм комбинирования кодового и float-фазового решения показал худшие результаты по сравнению с leveling-алгоритмом при выполнении координатных определений на интервалах менее 15-30

мин. на базовых удалениях более 50 км. При интервалах наблюдений порядка 30-60 мин. и более результаты обработки наблюдений алгоритмами практически не отличаются.

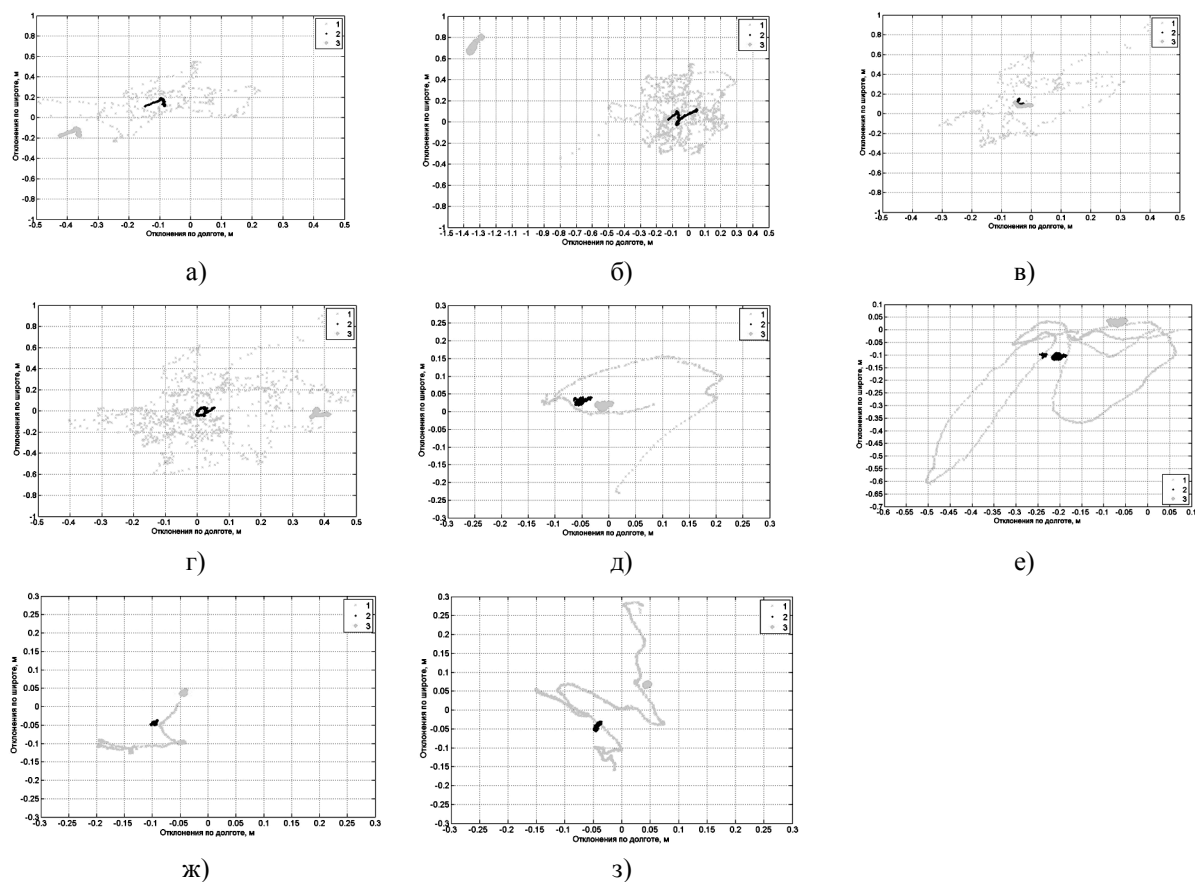


Рисунок 1 – Отклонения полученного решения по плановым координатам при обработке интервалов наблюдений 5 минут (а, в, д, ж) и 15 минут (б, г, е, з) при удалении от опорного приемника 97 км (а, б), 75 км (в, г), 70 м (д, е) и 3 м (ж, з); 1- Hatch-фильтр (100 с); 2- leveling- алгоритм; 3- float-решение

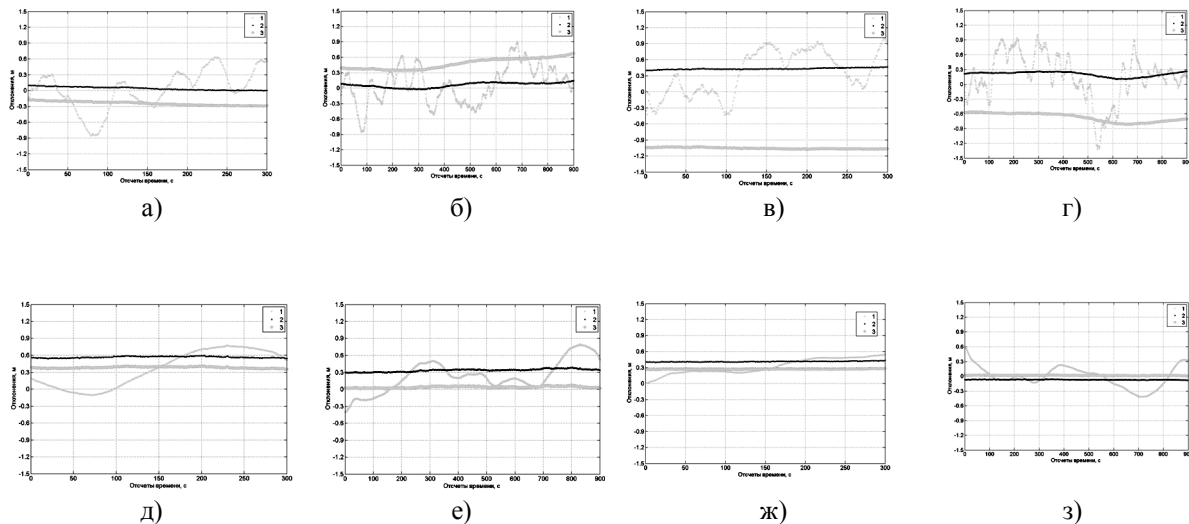


Рис. 2. – Отклонения полученного решения по высоте при обработке интервалов наблюдений 5 минут (а, в, д, ж) и 15 минут (б, г, е, з) при удалении от опорного приемника 97 км (а, б), 75 км (в, г), 70 м (д, е) и 3 м (ж, з); 1- Hatch-фильтр (100 с); 2- leveling- алгоритм; 3- float-решение

3. Предложенные усовершенствованные алгоритмы точного позиционирования позволяют получить координатное решение с близкой или даже с большей точностью по сравнению с решениями ведущих мировых производителей. В частности, сходные характеристики обеспечивают режимы позиционирования «RT-20» [9] (рис. 3) и «GLIDE» [10], реализованные

компанією NovAtel. Як видно із представлених характеристик отримані результати дозволяють отримувати сходині або навіть кращі результати на більших базових відстанях.

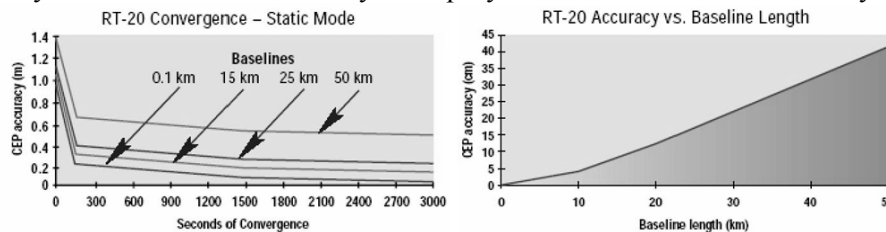


Рис. 3. – Сходимость решения в зависимости от интервала накопления и зависимость точности конечного решения от удаления между приемниками

4. По результатам исследований также следует отметить, что алгоритм комбинирования кодового и фазового float-решения является наиболее подходящим и рекомендуемым для обработки наблюдений ГЛОНАСС, т.к. позволяет учесть особенности частотного разноса спектров излучаемых сигналов.

5. «Сглаженное» координатное решение в значительной степени сужает область поиска целочисленных оценок фазовых неоднозначностей, т.е. использование такого решения является важной и необходимой составляющей обработки для получения надежного fixed-решения. С этой точки зрения наиболее подходящим для данного приложения является применение leveling-алгоритма и его модификаций, поскольку он позволяет получить координатное решение с требуемой точностью за наименьший интервал времени накопления наблюдений.

Выводы. В работе представлены результаты разработки и исследований алгоритмов одночастотного кодово-фазового ГНСС-позиционирования и навигации дециметрового уровня точности. Приведены результаты экспериментальных исследований и проведен их сравнительный анализ. Предложенные автором алгоритмы позволяют получать точностные характеристики позиционирования не хуже зарубежных аналогов, а в ряде случаев - и превосходящие их.

Дальнейшее развитие предложенных решений состоит в оптимизации настроек параметров разработанных алгоритмов в зависимости от условий их применения, улучшении характеристик за счет совместной обработки наблюдений нескольких ГНСС (например, GPS и ГЛОНАСС) с учетом их особенностей, а также в адаптации обрабатываемых процедур для режима реального времени.

Список литературных источников

1. Гофманн-ВелленгофБ. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика: пер. с англ. / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтнеггер, Д. Коллінз; пер. з англ. під ред. Я.С. Яцківа. – Київ: Наукова думка, 1995. – 380 с.
2. LeA.Q., TeunissenP.J.G. Optimal Recursive Least-Squares Filtering of GPS Pseudorange Measurements / A.Q. Le, P.J.G. Teunissen // Режим доступа: http://lr.home.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/LR/Organisatie/Afdelingen_en_Leerstoelen/Afdeling_RS/Mathematical_Geodesy_and_Positioning/Publications/Papers/1010/doc/2008.022_Optimal_Le.pdf.
3. Hatch, R., "The Synergism of GPS Code and Carrier Measurements," in Proceeding of 3rd International Symposium on Satellite Doppler Positioning, Las Cruces, NM, 1982.
4. Wu J.T. Effects on antenna orientation on GPS carrier phase // J.T. Wu, S.C. Wu, G.A. Hajj, W.I. Bertiger, S.M. Lichten // Режим доступа: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1992asdy.conf.1647W>.
5. Кондратюк В.М. Усовершенствованный метод сглаживания кинематических кодовых ГНСС-наблюдений с использованием фазовых / В.М. Кондратюк – Системи управління, навігації та зв'язку Вип. 3 (19). – К. – 2011. – С. 8-13.
6. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС [ред. В. Н. Харисова, А. И. Перова, В. А. Болдина:]. – М.: ИПРЖР, – 1998. – 400 с.
7. Жалило А.А. "ОСТАВА": многофункциональный программный инструментальный обработки и анализа GPS/GNSS наблюдений / А.А. Жалило, Д.А. Шелковенков // Интегрированные навигационные системы: XIV междунар. конф., май 2007., Россия: труды. – С.-Пб. 2007. – С. 319-321.
8. Желанов О.О. Результати експериментальних досліджень точності траєкторних GPS/GNSS вимірювань при виконанні аерофотозйомки з використанням програмних комплексів «ОСТАВА» та «GRAFNAV/GRAFNET™» / Д.О. Шелковенков, О.О. Желанов, О.О. Жалило // Всеукраїнський науково-технічний збірник «Радиотехніка». – 2008. – № 152. – С. 172-184.